



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



# ENGENHARIA DE MATERIAIS

## FENÔMENOS DE TRANSPORTE EM ENGENHARIA DE MATERIAIS

*Prof. Dr. Sérgio R. Montoro*

[sergio.montoro@usp.br](mailto:sergio.montoro@usp.br)



**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO**  
**Escola de Engenharia de Lorena – EEL**



# **AULA 4**

**REVISÃO E EXERCÍCIOS**



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



# MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

## REVISÃO



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### TAXA DE CALOR

$$q' = \left[ \frac{W}{m} \right]$$

$$q'' = \left[ \frac{W}{m^2} \right]$$

$$q''' = \left[ \frac{W}{m^3} \right]$$



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### A) CONDUÇÃO

Equação Fundamental (Lei de Fourier):

$$q = -k \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \Rightarrow \quad q = k \cdot A \cdot \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \Rightarrow \quad q = k \cdot A \cdot \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1}$$

Onde:

$q$  = fluxo de calor, em [W]

$A$  = área da seção, perpendicular ao fluxo, em [m<sup>2</sup>]

$\Delta T/\Delta x$  = gradiente de temperatura, em [°C/m]

$k$  = condutividade térmica do material, em [W/m.°C] ou [W/m.K]

$$T_1 > T_2$$

$$x_2 - x_1 = L$$



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### B) CONVECÇÃO

O fluxo de calor por convecção é diretamente proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície sólida e do fluido, e é determinada por meio da equação conhecida como a [lei de Newton](#) para o resfriamento:

$$q = h \cdot A \cdot (T_p - T_\infty)$$

$q$  = fluxo de calor, em [W]

$h$  = coeficiente de convecção, em [W/m<sup>2</sup>.°C]

$A$  = área do sólido em contato com o fluido, em [m<sup>2</sup>]

$T_p$  = temperatura da superfície ou parede sólida, em [°C]

$T_\infty$  = temperatura do fluido, em [°C]

OBS:  $h$  = coeficiente de película

$h$  = coeficiente de filme



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### C) RADIAÇÃO

$$q = \sigma \cdot A \cdot e \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$

Onde:

$q$  = fluxo de calor, em [W]

$\sigma$  = constante de Stefan-Boltzmann, [ $5,68 \cdot 10^{-8}$  W/m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>]

$A$  = área externa do corpo, em [m<sup>2</sup>]

$e$  = emissividade ( $e=1$ , para um “corpo negro ideal”)

$T$  = temperatura absoluta do corpo, em [K]



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 1: O custo da perda de calor através do telhado**

O telhado de uma casa com aquecimento elétrico possui 6 m de comprimento, 8 m de largura e 0,25 m de espessura e é feito de uma camada plana de concreto cuja condutibilidade térmica é  $k = 0,8 \text{ W/m.}^\circ\text{C}$ , conforme mostrado na figura a seguir.

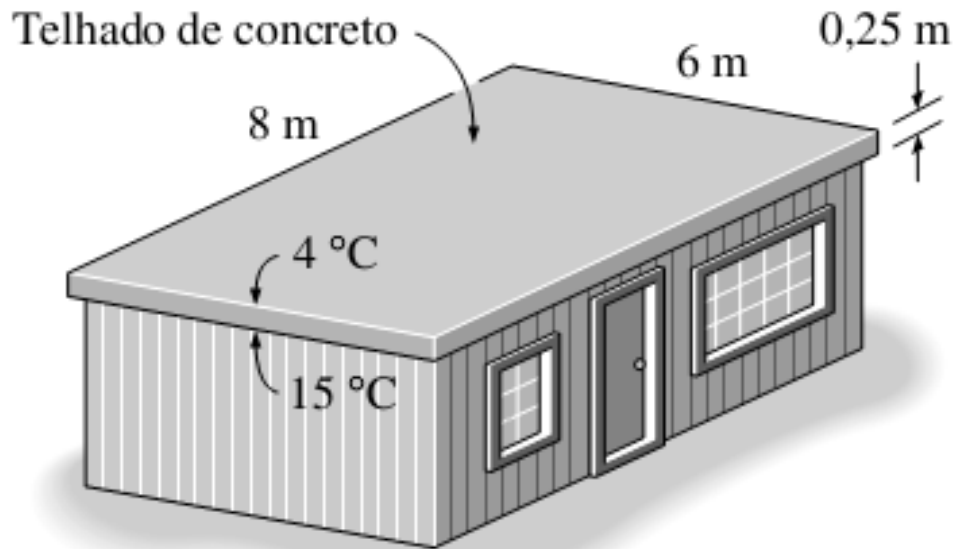
As temperaturas das faces interior e exterior do telhado, medidas em uma noite, são  $15^\circ\text{C}$  e  $4^\circ\text{C}$ , respectivamente, durante um período de 10 horas.





MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

**EXERCÍCIO PROPOSTO 1: O custo da perda de calor através do telhado**





## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 1: O custo da perda de calor através do telhado**

**Determine:**

- a) a taxa de perda de calor através do telhado naquela noite e;
- b) o custo dessa perda de calor para o proprietário, se o custo da eletricidade é de US\$ 0,08/kWh.



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 2: Efeito da radiação no conforto térmico**

Sentir “frio” no inverno e “calor” no verão é uma experiência comum, em nossas casas, mesmo quando o termostato é mantido na mesma posição. Isso é devido ao chamado “efeito radiação” resultante das trocas de calor por radiação entre os nossos corpos e as superfícies das paredes e do teto.

Considere uma pessoa de pé em uma sala mantida a 22 °C durante todo o tempo. As superfícies interiores das paredes, pavimentos e tetos estão numa temperatura média de 10 °C no inverno e 25 °C no verão.



## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 2: Efeito da radiação no conforto térmico**

Determinar a taxa de transferência de calor por radiação entre essa pessoa e as superfícies ao seu redor, se a área e a temperatura média das superfícies expostas da pessoa são de  $1,4 \text{ m}^2$  e  $30 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente (Figura a seguir).

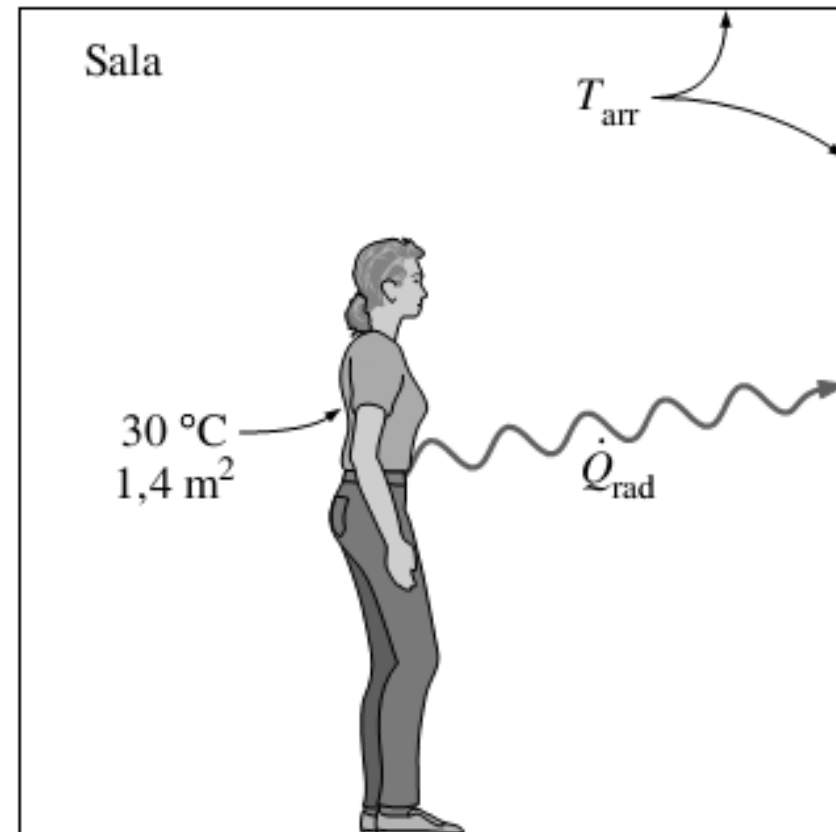


## MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

### EXERCÍCIO PROPOSTO 2: Efeito da radiação no conforto térmico

#### Suposições:

- ✓ Existem condições operacionais estáveis.
- ✓ A transferência de calor por convecção não é considerada.
- ✓ A pessoa é completamente cercada pelas superfícies interiores da sala.
- ✓ Os arredores são superfícies com uma temperatura uniforme.
- ✓ A emissividade da pessoa é  $e = 0,95$





## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 3: Perda de calor de uma pessoa**

Considere uma pessoa de pé em uma sala a  $20^{\circ}\text{C}$ . Determinar a taxa total de transferência de calor dessa pessoa, se a superfície exposta e a temperatura média da superfície da pessoa são  $1,6 \text{ m}^2$  e  $29^{\circ}\text{C}$ , respectivamente. O coeficiente de transferência de calor por convecção é de  $6 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$  (Figura a seguir)

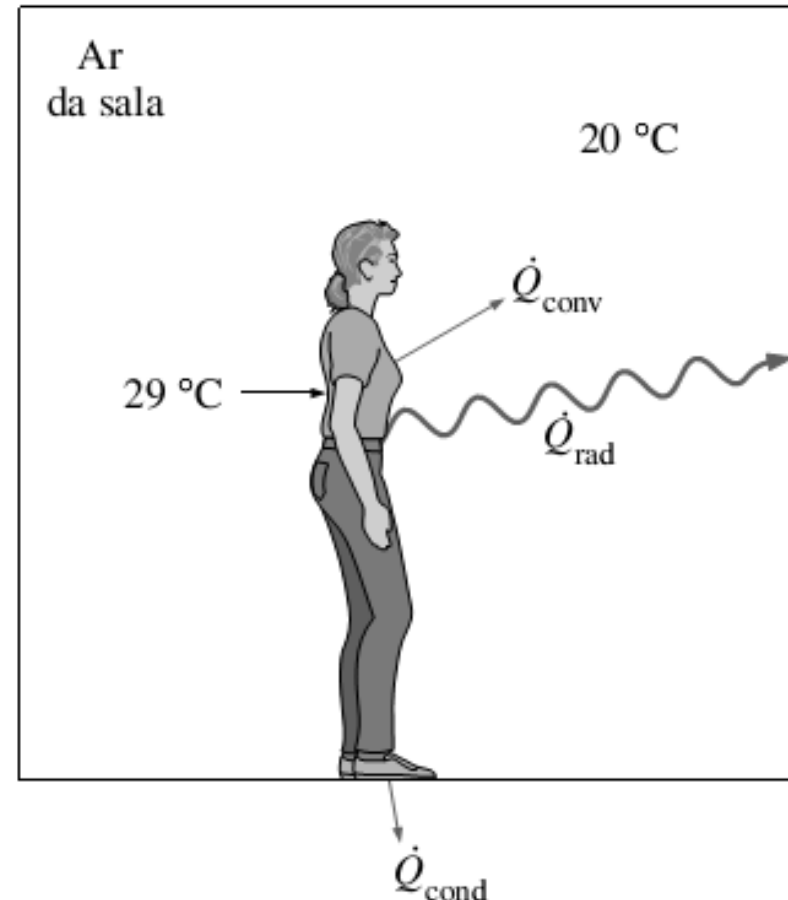


## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### EXERCÍCIO PROPOSTO 3: Perda de calor de uma pessoa

#### Suposições:

- ✓ Existem condições operacionais estacionárias.
- ✓ A pessoa está completamente cercada pelas superfícies interiores da sala.
- ✓ As superfícies circundantes estão à mesma temperatura que o ar no quarto.
- ✓ A condução de calor através dos pés para o piso é desprezada.
- ✓ A emissividade da pessoa é  $e = 0,95$ .





## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### **EXERCÍCIO PROPOSTO 4: Transferência de calor entre duas placas isotérmicas**

Considere a transferência de calor permanente entre duas grandes placas paralelas com temperaturas constantes  $T_1 = 300 \text{ K}$  e  $T_2 = 200 \text{ K}$ , que estão separadas de  $L = 1 \text{ cm}$ , como mostrado na Figura a seguir.

Assumindo as superfícies como corpos negros (emissividade  $e = 1$ ), determinar a taxa de transferência de calor entre as placas por unidade de área, assumindo que o espaço entre as placas é:





## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

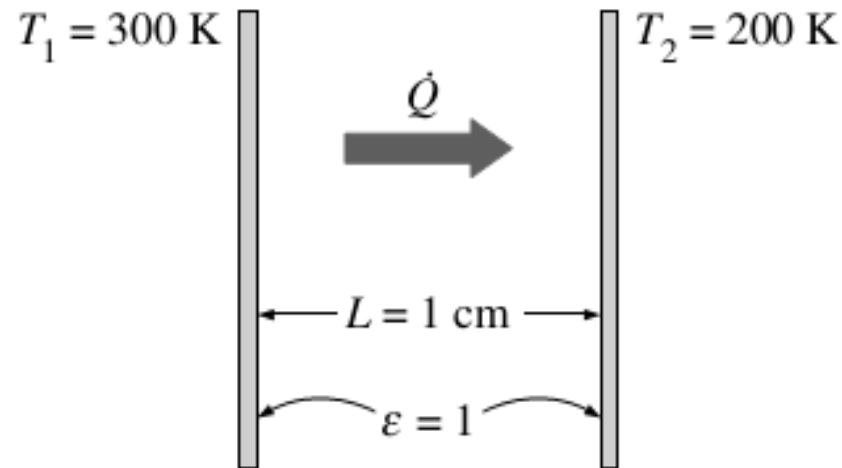
### **EXERCÍCIO PROPOSTO 4: Transferência de calor entre duas placas isotérmicas**

- (a) preenchido com ar atmosférico,
- (b) evacuado,
- (c) cheio com isolamento de poliuretano, e
- (d) preenchido com um superisolamento que tem uma condutividade térmica aparente de  $0,00002 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ .



## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### EXERCÍCIO PROPOSTO 4: Transferência de calor entre duas placas isotérmicas





## MECANISMOS SIMULTÂNEOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

### EXERCÍCIO PROPOSTO 4: Transferência de calor entre duas placas isotérmicas

#### Suposições:

- ✓ Existem condições operacionais estáveis.
- ✓ Não existem correntes de convecção natural no ar entre as placas.
- ✓ As superfícies são negras, portanto,  $\epsilon = 1$ .

**Propriedades:** A condutividade térmica na temperatura média de 250 K é  $k = 0,0219$  W/m·K para o ar,  $0,026$  W/m·K para o isolamento de poliuretano, e de  $0,00002$  W/m·K para o superisolamento.



## EXERCÍCIO EXTRA

Uma caixa de gelo é construída de isopor ( $k = 0,033 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ ) com dimensões internas de  $25 \times 40 \times 100 \text{ cm}$ . A espessura da parede de isopor é  $5,0 \text{ cm}$ .

**CONDIÇÃO 1:** A superfície externa da caixa está exposta ao ar a  $25^\circ\text{C}$ . Se a caixa está completamente cheia de gelo, calcule o tempo necessário para que todo o gelo seja derretido. Explique suas hipóteses.

**CONDIÇÃO 2:** Se a espessura da caixa aumentar para  $6 \text{ cm}$ , quanto tempo será necessário para que todo o gelo seja derretido?

DADOS: Calor de fusão da água é  $300 \text{ kJ/kg}$ . Considere a massa específica do gelo =  $0,9178 \text{ g/cm}^3$ .